CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DE ÁREAS UTILIZADAS PARA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

VAGNER ROBERTO ELIS¹ & LÁZARO VALENTIM ZUQUETTE²

ABSTRACT *GEOPHYSICAL CHARACTERIZATION OF URBAN WASTE DISPOSAL AREAS* In recent years has been a steady increase in geoenvironmental engineering projects that deal with some kind of contaminant, leading to changes and enhancement in the site characterization techniques. One of the major concerns is the soil and water contamination caused by the waste disposal. *In situ* testing methods often provides good information about sites affected by groundwater contamination problem where stratigraphical, geotechnical, hydrogeological and other environmental informations are required on a specific and/or screening basis. Geophysical techniques is a good way to get some information required in a good site characterization program. This paper presents and compares results obtained by characterization programs carried out in a deactivated waste landfill and in the actual sanitary landfill areas, in Ribeirão Preto region, State of São Paulo, Brazil. In the first site domestic waste were inappropriate disposed in an area constituted by porous soils overlapping sandstones of Botucatu Formation. The actual sanitary landfill operates according to technical rules in a favorable area, composed by clayey residual soil from basalts of the Serra Geral Formation. The site characterization program included geoelectrical sounding and profiling surveys. The results showed that integrating this geophysical techniques and elaborating a rational planning it is possible to assess the volume of waste, flow path and evaluate the environmental impact caused by the waste disposal.

Keywords: Applied geophysics; electrical resistivity; solid domestic wastes.

RESUMO Nos últimos dez anos tem havido um aumento contínuo do número de projetos que envolvem a presença de algum tipo de disposição de resíduos contaminantes no solo o que tem levado a mudanças nas técnicas de investigação e caracterização. Para instalação de áreas de disposição de resíduos é necessária a realização de estudos detalhados das características do meio físico, principalmente relacionadas à capacidade dos materiais em atenuar a carga de contaminantes e isolá-la de possíveis aquíferos, bem como das águas de uma maneira geral. Para tanto é necessário conhecer os materiais geológicos e suas características geotécnicas, hidrogeológicas e físico-químicas, assim como seus arranjos espaciais. Uma ferramenta que tem utilização crescente para essa finalidade é a geofísica, principalmente os métodos elétricos, em especial a eletrorresistividade. Neste artigo apresentam-se e discutem-se resultados de estudos realizados no antigo depósito de resíduos sólidos urbanos e no aterro sanitário em atividade da Cidade de Ribeirão Preto, São Paulo. No primeiro local foram dispostos inadequadamente resíduos urbanos em área de ocorrência de solos arenosos permeáveis e arenitos da Formação Botucatu. O atual aterro sanitário está instalado em área de solo argiloso originado de basaltos e opera de acordo com normas técnicas estabelecidas para esse tipo de empreendimento. Os ensaios realizados foram sondagens e caminhamentos elétricos. Os resultados mostram que a aplicação dessas duas técnicas permite estudar o volume de resíduos, o fluxo das águas subsuperficiais e avaliar o nível de alteração causado pelos líquidos percolados no meio ambiente.

Palavras-chave: Geofísica Aplicada; Resistividade elétrica; Resíduos sólidos urbanos.

INTRODUÇÃO A crescente concentração populacional em áreas urbanas e o conseqüente aumento da produção de resíduos domésticos e industriais vêm gerando muitos problemas relacionados a forma de disposição desses resíduos e conseqüentemente em relação à contaminação de solos e águas subsuperficiais. Por essa razão, as áreas de disposição de resíduos, tanto sólidos quanto líquidos, têm merecido especial atenção por parte dos órgãos públicos e instituições de pesquisa relacionados ao meio ambiente, no sentido de avaliar o nível de poluição causado por estes resíduos e procurar estabelecer procedimentos para minimizar seus impactos negativos. É importante ressaltar que no Estado de São Paulo existem pelo menos 2000 sítios que foram ou estão sendo utilizados para disposição de resíduos, e poucos contam com alguma forma de controle ou investigação adequada.

Dentro desse contexto, alguns métodos geofísicos vêm sendo utilizados para detectar e monitorar a contaminação gerada por líquidos percolados dos depósitos de resíduos industriais e urbanos. Devido às características químicas desses resíduos,

que normalmente se refletem em um aumento da condutividade elétrica no local onde estão dispostos, utilizam-se principalmente os métodos elétricos com bons resultados (Benson *et al.*, 1982). Desde o final da década de 60, vários pesquisadores, principalmente na América do Norte, demonstraram que o método da eletrorresistividade poderia ser usado para definir a profundidade e a extensão de um corpo de águas subsuperficiais contaminado, mostrando-se um procedimento mais rápido e de custos mais baixos que o método tradicional de definição da área contaminada pela análise de amostras de água coletada em poços de monitoramento (Stollar & Roux 1975). A aplicação desse método geofísico em estudos relacionados a contaminação de águas subsuperficiais, principalmente por meio das técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico, é amplamente relatada na literatura. Trabalhos recentes mostram a grande eficiência e versatilidade da eletrorresistividade, fornecendo informações importantes em estudos ambientais e hidrogeológicos (Hyoung-Soo & Yeonghwa 1997, Gois *et al.* 1997, Kollmann & Supper 1997,

1 Departamento de Geofísica – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - Universidade de São Paulo - Rua do Matão, 1226 CEP 05508-900 São Paulo – SP. Fax (11) 3818 5034. E-mail: vagnelis@iag.usp.br

2 Departamento de Geotecnica – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - Av. Trabalhador São Carlense, 400 CEP 13560-250 São Carlos – SP. Fax (16) 273-9509. E-mail: lazarus1@sc.usp.br

Nascimento *et al.* 1999).

Dessa forma, o método da eletrorresistividade, que mostra-se eficiente e de baixo custo operacional, caracteriza-se como uma ferramenta adequada ao estudo de áreas de disposição de resíduos, principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde os problemas ambientais gerados por essa atividade são grandes. Exemplo desse tipo de problema ocorre na cidade de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, onde até alguns anos os resíduos urbanos foram dispostos de forma inadequada, em área constituída por rochas e materiais inconsolidados arenosos que constituem a principal fonte de água para o consumo humano e industrial. Nesse trabalho são apresentados e comparados os resultados obtidos pela aplicação do método da eletrorresistividade na caracterização da antiga área de disposição de resíduos urbanos, atualmente desativada, e do aterro sanitário em atividade, instalado em local mais apropriado e em operação com supervisão técnica apropriada.

ÁREAS DE ESTUDO A cidade de Ribeirão Preto encontra-se na porção nordeste do estado de São Paulo, Brasil (Fig. 1), com uma população atual ao redor de 650 mil habitantes,

Fig. 1 – Mapa de localização da cidade de Ribeirão Preto.

produzindo diariamente em torno de 400 ton de resíduos urbanos, 15 ton de resíduos relacionados aos serviços da saúde, 100 ton de resíduos sólidos industriais e em torno de 1.000 m³ de resíduos líquidos industriais.

A malha urbana ocupa mais de 50% da extensão territorial do município e apresenta uma taxa de crescimento populacional variando de 1,5 a 2% por ano. Uma característica fundamental está relacionada ao fato que a totalidade da água consumida pela cidade para fins residenciais, industriais e com o sistema de saúde é de origem subsuperficial, extraída por meio de poços profundos que apresentam profundidades variando de 40 a 500 m.

Na região afloram os basaltos da Formação Serra Geral e os arenitos da Formação Botucatu, e em áreas restritas, os arenitos da Formação Pirambóia (Fig. 2). Estes tipos rochosos normalmente estão sotopostos a pacotes de materiais inconsolidados

residuais e retrabalhados (colúvios) com espessuras que variam de 1 a 40 m.

Cerca de 30% da área é caracterizada como zona de recarga direta do aquífero Botucatu que apresenta poços profundos com vazões de até 300 m³/hora. No restante da área os arenitos do aquífero Botucatu encontram-se recobertos por um pacote de basaltos muito fraturados com espessuras variáveis entre 20 e 300m, em condição parcialmente confinada. Nesta porção existe exploração das águas tanto do aquífero poroso (arenitos) quanto do fraturado (basaltos). No caso do aquífero fraturado, o mesmo está recoberto por um pacote de material inconsolidado argiloso que funciona como uma zona de transferência.

A partir dos anos 40 os resíduos produzidos pela ocupação urbana e industrial foram dispostos em 4 locais diferentes, sendo que os dois mais recentes (números 1 e 2) apresentados no mapa da Figura 2 foram estudados por meio de métodos geofísicos.

Lixão desativado de Ribeirão Preto - Local nº 1 O Local nº 1 é caracterizado como um lixão e foi utilizado a partir dos anos 74/75 até meados do ano de 1989, com uma disposição diária de até 300 toneladas de resíduos oriundos dos mais diferentes tipos de fontes. Os resíduos foram dispostos em 2 valas separadas por uma faixa de 10 m de largura e abertas sem nenhum critério técnico.

Considerando as características geológico-geotécnicas utilizadas por Zuquette *et al.* (1994) para classificação de áreas quanto à adequabilidade para disposição de resíduos, pode-se relacionar alguns atributos da área em questão que a classificam como desfavorável ou restritiva, de acordo com a Tabela 1.

Aterro Sanitário de Ribeirão Preto – Local nº 2 O Aterro Sanitário em atividade, localizado a oeste da cidade, em zona de ocorrência de basaltos, foi implantado em local previamente avaliado por meio de estudo de impacto ambiental. Atualmente são dispostos somente os resíduos urbanos, enquanto os originários dos serviços de saúde são devidamente incinerados.

O substrato geológico é representado por basalto da Formação Serra Geral, que está recoberto pelo manto de alteração e solos desenvolvidos a partir dessa rocha. Os ensaios diretos realizados por ocasião da elaboração do estudo de impacto ambiental (sondagens SPT, poço piezométrico) forneceram o seguinte perfil para a área:

- Solo + manto de decomposição com espessuras de 15 a 17 m até atingir o saprolito. Os solos da área são classificados pedologicamente como latossolos roxos, sendo caracterizados por textura argilosa (mais de 70% de finos).
- Saprolito (rocha parcialmente decomposta) atingindo profundidades de 20 a 30 m.
- Basalto (rocha fresca) com o topo ocorrendo a profundidades superiores a 20 m. Apresenta-se como uma camada compacta, pouco fraturada.

O nível estático estava situado, em maio de 1988, em torno de 19,5 m de profundidade.

De acordo com a classificação proposta por Zuquette *et al.* (1994) quanto à adequabilidade da área para disposição de resíduos urbanos, a maioria dos atributos são considerados favoráveis a esse tipo de utilização, sendo que apenas a capacidade de troca catiônica é enquadrada como moderadamente favo-

rável, como pode ser observado na Tabela 2.

MÉTODO DE LEVANTAMENTO GEOFÍSICO O método da eletrorresistividade é provavelmente mais utilizado, principalmente a técnica de sondagem elétrica, devido a possibilidade de aplicação nos mais diversos campos de estudo, como Mineração, Geologia de Engenharia, Hidrogeologia e estudos ambientais. A resistividade elétrica relaciona-se aos mecanismos de propagação de corrente elétrica nos materiais. Em geral, a propagação de corrente elétrica em solos e rochas se dá devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras, sendo afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, teor em água e quantidade e natureza dos sais dissolvidos. Dentre esses fatores, os mais importantes são, sem dúvida, a quantidade de água contida e a salinidade dessa água. O aumento do teor de umidade e da quantidade de sais dissolvidos causa uma diminuição dos valores de resistividade. Essa condição é que permite a imensa possibilidade de aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos, onde a presença de água da zona saturada e o aumento da quantidade de contaminantes ricos em sais podem ser investigados.

A variedade de técnicas de aplicação de ensaios que possibilitam a investigação no sentido vertical (sondagem elétrica) ou lateral (caminhamento elétrico) e uma variedade ainda

maior de arranjos de campo (Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo, Lee, entre outros) conferem ao método uma grande versatilidade. Na Figura 3 observa-se as configurações de campo de sondagem elétrica e de caminhamento dipolo dipolo. Essas várias possibilidades de aplicação de ensaios de campo permite que a utilização de técnicas e arranjos diferentes atendam às necessidades de investigação dos mais variados parâmetros geológico-geotécnicos para a caracterização da área e determinação da zona contaminada.

A aplicação de caminhamento elétrico dipolo-dipolo teve por objetivo o mapeamento da zona contaminada (posição dos resíduos e frente de contaminação) e as sondagens elétricas com arranjos Schlumberger e dipolar a determinação da profundidade da zona saturada e da espessura dos materiais inconsolidados, além da espessura da camada de resíduos. Esse conjunto de informações é fundamental na caracterização de áreas utilizadas para disposição de resíduos urbanos, em vista das necessidades de monitoramento para o acompanhamento dos problemas ambientais.

ENSAIOS E RESULTADOS **Lixão desativado de Ribeirão Preto** Nesta área foram realizados, entre março de 1995 e agosto de 1998 uma série de ensaios geoelétricos cuja localização na área em estudo é apresentada na Figura 4, sendo: 10 sondagens elétricas verticais arranjo Schlumberger, com

Figura 2 – Mapa geológico da região de Ribeirão Preto e a localização das áreas utilizadas para disposição de resíduos.

Tabela 1 – Características da área do Lixão desativado

Atributo	Característica local	Classe
Litologia	Arenito Fm Botucatu	Não favorável
Textura do solo	Pred. arenoso	Não favorável
Variação do perfil	heterogênea	Moderada
Permeabilidade do solo	10^{-6} a 10^{-4} cm/s	Moderada a favorável
CTC	<5 a 7 meq/100g	Não favorável a moderada
Nível da zona saturada (abaixo da base do aterro)	7 a 10 metros	Moderada
Águas subterrâneas	Área de recarga	Não favorável
Relevo	Divisor topográfico	Não favorável

meq - miliequivalente

Tabela 2 – Características geológico-geotécnicas da área do Aterro Sanitário de Ribeirão Preto

Atributo	Característica local	Classe
Litologia	Basaltos Serra Geral	Moderada a favorável
Prof. do topo rochoso	>20 metros	Favorável
Textura do solo	Pred. argiloso	Favorável
Variação do perfil	homogênea	Não favorável
Permeabilidade do solo	10^{-3} cm/s	Favorável
CTC	7 meq/100g	Moderada
Nível da zona saturada (abaixo da base do aterro)	> 12 metros	Favorável
Relevo	Encosta suave (declividade 5%)	Favorável

meq - miliequivalente

Figura 3 – Configuração dos ensaios de sondagem elétrica vertical (a) e caminhamento elétrico dipolo dipolo (b).

espaçamento AB máximo de 300 m, denominadas de SEV1 a SEV10; 1 sondagem dipolar axial, com espaçamento E de 100 m, denominada de SD11; 9 linhas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo com espaçamento 10 m, denominadas de C1 a C9; repetição, em períodos diferentes, dos ensaios nas linhas C3 e C4; e 4 linhas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo com espaçamento 20 m, denominadas de C1a a C4a.

As SEVs executadas podem ser divididas, basicamente, em dois conjuntos: um representado pelos ensaios realizados den-

tro das cavas preenchidas com resíduos e outro pelos executados fora das cavas. A SEV 7 pode ser considerada como um caso intermediário, pois foi executada no espaço entre as duas cavas, onde há forte influência dos resíduos.

As SEVs 6, 8 e 9, realizadas dentro das cavas, possibilitaram a definição da espessura da camada de resíduos, com resistividades muito baixas (2,4 a 11 ohm.m), e consequentemente a base do aterro, definida por valores de resistividade mais elevados (367 a 937 ohm.m). Na Tabela 3 são apresenta-

dos os resultados do modelo geoeletrico obtido para esse primeiro conjunto de sondagens.

O posicionamento da zona saturada, além de informações a respeito dos materiais presentes, foram obtidos por meio da interpretação das sondagens 1, 2, 3, 4, 5 e 10, executadas fora das cavas (exemplo de sondagem pertencente a esse conjunto é a SEV 5, apresentada na Figura 5). Nessa sondagem, a camada com 2328 ohm.m representa o solo residual arenoso que ocorre, também, como base do aterro, porém com valores de resistividade bastante inferiores, o que sugere que existe uma percolação de chorume por este material. Os valores de

resistividade elétrica obtidos para a zona saturada variaram de 20 a 88 ohm.m. Os resultados obtidos para as SEVs pertencentes a esse grupo são apresentados de forma sintética na Tabela 4. Os menores valores para a camada 2 ocorrem onde há maior teor de argila em função da presença de cobertura coluvionar mais espessa.

Os resultados das SEVs mostraram uma grande heterogeneidade nos modelos geoeletricos obtidos, sobretudo em relação às camadas mais superficiais. Essa heterogeneidade elétrica reflete a intensa mistura de materiais que caracterizam a cobertura coluvionar existente na área, resultante de solos residuais arenosos (Formação Botucatu) e residuais argilosos e argilo-siltosos (Formação Serra Geral), além da menor ou maior influência da presença de líquidos contaminados.

A sondagem dipolar axial foi realizada com o objetivo de obter a profundidade da zona saturada abaixo das cavas preenchidas com resíduos. Essas cavas têm cerca de 200 m de comprimento, e por meio de SEVs convencionais não foi possível atingir a zona saturada sem colocar os eletrodos fora das cavas, o que é desaconselhável devido a possíveis efeitos de heterogeneidade lateral, que poderiam introduzir erros nos resultados da sondagem. O resultado dessa sondagem é apresentado na Figura 6, que mostra a posição dos resíduos (3,3 ohm.m), a base do aterro (63 ohm.m) e a zona saturada (2 ohm.m). A baixa resistividade da zona saturada abaixo da cava em relação aos valores obtidos nas SEVs executadas fora dos resíduos (20 a 88 ohm.m) denota a percolação do chorume a partir da base do aterro (material residual arenoso de permeabilidade alta) e contaminação do aquífero.

A realização dos ensaios de sondagem elétrica permitiu definir, além das relações entre os resíduos e o meio geológico, algumas características quanto as variações das camadas de solo e, principalmente, a posição da zona saturada. Considerando os dados obtidos para a profundidade da zona saturada foi elaborado o mapa de fluxo das águas subsuperficiais, apresentado na Figura 7, que mostra que o sentido do fluxo é predominantemente NE, contrário ao fluxo regional esperado para o Aquífero Botucatu.

As seções de resistividade aparente obtidas nos ensaios de caminhamento elétrico mostraram um forte contraste entre as zonas preenchidas com resíduos (valores de resistividade aparente inferiores a 20 ohm.m), as afetadas pela contaminação (valores entre 20 e 200 ohm.m) e o terreno natural (em geral, valores superiores a 200 ohm.m), permitindo assim identificar os locais mais afetados. Essas seções foram interpretadas e modelos 2D foram gerados, possibilitando uma análise mais detalhada das relações entre os materiais naturais e os resíduos. É importante ressaltar que os resultados das sondagens elétricas serviram de base para a criação de um primeiro modelo de cada seção de caminhamento elétrico, que posteriormente foi refinado por meio de software de modelagem 2D.

Figura 4 – Mapa de localização dos ensaios geofísicos no Lixão de Ribeirão Preto.

Tabela 3 – Modelo geoeletrico das SEVs realizadas sobre cavas.

Camada	Espessura (m)	Resistividade (ohm.m)	Interpretação
1	0 – 3,8	58 – 87	Cobertura de aterro
2	0 – 5,3	8 – 11	Resíduos
3	7,4 – 10,2	2,4 – 7	Resíduos + líquidos percolados
4	-	367 – 937	Base da cava

Figura 5 – Curva de campo e interpretação da SEV 5.

Figura 6 - Interpretação da Sondagem Dipolar (SD11).

Tabela 4 – Modelo geoeletrico obtido para as SEVs realizadas fora das cavas preenchidas com resíduos.

Camada	Espessura (m)		Resistividade (ohm.m)	Interpretação
1	1,6 - 5,2		61 - 5605	Solo superficial
2	7,6 - 19,5		171 - 18292	S. residual / cobertura coluvionar (secos)
3	1,2 - 13,9		97 - 1200	Solo residual acima da zona saturada
4	-	31,7	20 - 88	Zona saturada (solo residual arenoso / arenito)
5	-		3956	Diabásio *

*Ocorre apenas na SEV 2.

A linha C4, apresentada na Figura 8, intercepta as duas cavas transversalmente e mostra claramente as posições ocupadas pelos resíduos (6,7 a 8 ohm.m), a zona de percolação de chorume na base das cavas com resistividade bem inferior (80 ohm.m) àquela apresentado pelo solo residual arenoso fora da área de influência da contaminação (2330 ohm.m). A zona contaminada dentro do aquífero livre (11 ohm.m) e a zona saturada não contaminada dentro dos sedimentos arenosos (152 ohm.m) também são individualizadas.

As linhas de ensaio posicionadas fora das cavas preenchidas

com resíduos foram executadas visando detectar a presença da pluma de contaminação nas cercanias das cavas. Na linha C8, apresentada na Figura 9, observa-se a presença de zona contaminada dentro da camada saturada (resistividade de 7 ohm.m), que denota o desenvolvimento de uma frente de contaminação no sentido NNE. A presença de contaminação aparece desenvolvendo-se do centro para o leste da seção. Nas seções posicionadas fora das cavas, pode ser observada a grande variação textural dos solos, desde materiais com maior percentual de argila (valores de resistividade de 91 a 221 ohm.m) a areno-

Figura 7 - Mapa de direção do fluxo subsuperficial definido com base nas SEVs.

Figura 8 - Seção interpretada da linha C4, no sentido transversal às cavas.

sos com valores de até 5247 ohm.m, que como já referido anteriormente, é reflexo da presença da cobertura coluvionar originada da mistura das rochas básicas e do arenito.

Com o objetivo de analisar a influência de variações pluviométricas na área, ensaios foram repetidos em algumas linhas em diferentes condições de umidade. Esses ensaios mostram uma relação entre a época de aplicação do ensaio (chuvas ou estiagem) e os valores de resistividade aparente. Como pode ser observado na Figura 10, que apresenta as seções de resistividade aparente da linha C4 obtidas em diferentes períodos, a maior pluviosidade nas estações chuvosas está relacionada a uma diminuição dos valores de resistividade dentro da zona contaminada, indicando que o conseqüente aumento do volume de líquido favorece a sua infiltração, atingindo as camadas inferiores. Esse comportamento pode ser observado claramente nos ensaios executados na Linha C4 em estações climáticas consecutivas durante o ano de 1995. Um ensaio executado nessa mesma linha no de 1998, em período de seca, indica que a área mantém esse comportamento, com o local dos resíduos apresentando valores de resistividade aparente superiores aqueles obtidos nas épocas de chuvas.

O conjunto de dados de caminhamento elétrico de março de 1995 foi utilizado para a elaboração de mapas de resistividade aparente dos níveis teóricos 10, 20 e 30 m, os quais possibilitaram uma análise do comportamento da contaminação espacialmente. Considerando a zona saturada a cerca de 20 m de profundidade, o mapa referente ao nível 10 m (Fig. 11) mostra o formato da zona contaminada acima do nível da zona saturada. Os valores de resistividade aparente inferiores a 200 ohm.m podem ser considerados como representativos de contaminação, pois tem-se em geral nas zonas fora do Lixão valores de *background* sempre superiores, chegando até a 2000 ohm.m. Pode-se observar que a contaminação, em geral, fica restrita a área das cavas, exceto no sentido W, onde aparece

uma zona com valores entre 100 e 200 ohm.m. De acordo com os dados do ensaio realizado nesse local, ocorre uma faixa mais condutora superficial (91 ohm.m) interpretada como uma porção mais argilosa ou solo superficial contaminado.

O mapa do nível teórico 30 m caracteriza a zona saturada e possibilita uma visualização do desenvolvimento de uma frente de contaminação a partir das cavas. Esse mapa mostra uma área com valores de resistividade aparente inferiores a 200 ohm.m que caracteriza a zona contaminada se desenvolvendo ainda no sentido norte-nordeste (Figura 12). A disposição dos valores de resistividade aparente para esse nível, sugere, então, que não existem mais resíduos enterrados a essa profundidade, porém ocorre migração vertical da carga contaminante (líquidos percolados). Essa situação também é bem caracterizada na seção da linha C4 (vide Fig. 8), bem como nas sondagens elétricas executadas diretamente sobre os resíduos. Assim, a contaminação atinge a zona saturada, e como no nível 20 m, mostra a frente se desenvolvendo principalmente no sentido do fluxo subsuperficial.

Entretanto, apesar desses resultados obtidos pelas técnicas geofísicas, análises realizadas em águas coletadas em 1991 nos poços de monitoramento existentes (18 anos após a instalação do lixão e 1 ano após sua desativação) e localizados a norte e noroeste (poços n.º 1 e 2) e a leste (poços n.º 3 e 4) das cavas preenchidas com lixo não apresentaram variações nos parâmetros medidos que caracterizassem seguramente contaminação. Esses poços têm 20 m de profundidade, suficiente para atingir a parte mais superior do nível d'água. Somente o poço n.º 2 apresentou valores anômalos em relação aos demais quanto às concentrações dos íons Na^+ , Cu^{2+} e Mn^{++} e valor mais alto de condutividade. Este poço está locado em uma posição, que, segundo os dados geofísicos, estaria sob efeito de contaminação (as localizações dos poços de monitoramento podem ser observadas nas Figuras 11 e 12).

Figura 9 – Seção de resistividade elétrica interpretada da linha C8.

Figura 10 – Seções de resistividade aparente da linha C4 para períodos secos e chuvosos.

Essa situação sugere que se os ensaios geofísicos fossem realizados de forma regular e anterior a instalação desses poços, certamente estes seriam locados e dimensionados mais racionalmente e uma análise mais cuidadosa das suas águas poderia levar a outros resultados, que seriam de grande utilidade na avaliação da contaminação. A anomalia condutora existente no mapa de resistividade indica que existe uma frente de contaminação desenvolvendo-se a partir dos resíduos e caminhando no sentido nordeste, seguindo o fluxo subsuperficial.

Aterro Sanitário de Ribeirão Preto Na área do aterro sa-

nitário em atividade de Ribeirão Preto, foram realizados, entre julho de 1995 e julho de 1998, os seguintes ensaios: 6 linhas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo com espaçamento de 10 m, denominadas de C1 a C6, e em períodos diferentes, as linhas C1, C4 e C7 foram repetidas; dez sondagens elétricas verticais, arranjo Schlumberger, com AB máximo de 300 m, denominadas de SEV1 a SEV10; 1 sondagem dipolar axial, com abertura "n" de 200 m, denominada de SD11; e 3 linhas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo com espaçamento de 20 m, denominadas de C1, C3 e C7 (as linhas C1 e C3 são as mesmas para os arranjos com espaçamentos 10 e 20 m).

Figura 11 – Mapa de resistividade aparente do nível 10 m, mostrando a área de baixa resistividade que caracteriza a área de influência dos resíduos acima da zona saturada.

Figura 12 – Mapa de resistividade aparente do nível 30 m, mostrando uma área de baixa resistividade que caracteriza a contaminação gerada pelos resíduos dispostos atingindo a zona saturada.

A localização desses ensaios na área em estudo é apresentada na Figura 13 e as SEVs podem ser divididas, assim como na área do Lixão de Ribeirão Preto (Local nº 1), em dois conjuntos: o primeiro representado pelas sondagens executadas no corpo do aterro (SEVs 4, 5 e 6) e outro representado pelos ensaios realizados fora dos resíduos.

A definição da espessura da camada de resíduos, com resistividades baixas (5 a 16 ohm.m) e da base do aterro, com valores de resistividade mais elevados (79 a 760 ohm) foi dada pelas SEVs executadas no corpo dos resíduos, que encontram-se na Tabela 5.

A grande variação dos valores de resistividade obtidos para a base do aterro sanitário pode ser devida a uma maior influência dos líquidos percolados, pois a SEV que apresentou o menor valor (SEV 5 - 79 ohm.m) está posicionada muito próxima do local onde os líquidos são re-infiltrados para recirculação nos resíduos.

O outro grupo, representado pelas sondagens posicionadas nos entornos do aterro sanitário, possibilitou a caracterização das diversas camadas de solo e das posições do nível da zona saturada e do topo basalto inalterado, sendo que os resultados estão apresentados de forma resumida na Tabela 6.

Na época de realização dos ensaios (julho de 1995) a zona saturada estava posicionada entre 15,1 e 20,4 m de profundi-

dade, caracterizado por valores de resistividade entre 2,5 e 57 ohm.m. Alguns valores muito baixos podem caracterizar a influência de contaminantes na zona saturada, principalmente se for levado em consideração que as sondagens onde ocorreram os valores mais baixos (SEVs 3 e 10) estão praticamente nas bordas do aterro sanitário. Porém, mesmo que alguma contaminação esteja atingindo as águas subsuperficiais, o desenvolvimento de uma frente de contaminação não está evidente nos resultados geofísicos, como será mostrado mais adiante. Além disso, devido a textura argilosa do solo, que com a presença de água apresenta valores de resistividades baixos, existe a possibilidade de uma pequena quantidade de fons ser suficiente para causar uma sensível diminuição da resistividade elétrica.

O topo do basalto inalterado está posicionado em torno de 30 m de profundidade, e é representado por valores de resistividade entre 185 e 1900 ohm.m. Essa variação nos valores de resistividade provavelmente ocorre em função de variação do grau de fraturamento e de alteração da rocha. As profundidades obtidas para o nível da zona saturada e o topo rochoso são bastante coerentes com aquelas definidas pelo poço piezo-métrico existente na área.

A sondagem dipolar axial foi realizada com o mesmo objetivo do área do lixão de Ribeirão Preto, ou seja, definir a posição da zona saturada sob a área preenchida com resíduos (Fi-

Figura 13 - Localização dos ensaios geofísicos realizados no aterro sanitário de Ribeirão Preto.

gura 14), que tem forma aproximadamente quadrada com cerca de 300 x 300 m, e por meio de SEVs convencionais não foi possível atingir a zona saturada. Com a sondagem dipolar, novamente o problema foi resolvido, e a zona saturada estava posicionada a cerca de 8 m abaixo da base do aterro, situação próxima da favorável (mínimo de 10 m) de acordo com a proposição de Zuquette *et al.* (1994) para áreas favoráveis à instalação de aterros sanitários.

Com a definição da posição da zona saturada pelas sondagens elétricas foi elaborado o mapa de fluxo subsuperficial apresentado na Figura 15, onde pode ser observado que o sentido principal do fluxo local é para norte.

Os ensaios de caminhada elétrica dipolo-dipolo possibilitaram determinar as relações entre os resíduos e os materiais geológicos naturais. Como ocorreu na área do Lixão de Ribeirão Preto, os locais preenchidos com resíduos apresentaram valores de resistividade aparente muito inferiores aos obtidos para os materiais geológicos, possibilitando a definição das áreas afetadas e da estrutura espacial do aterro sanitário.

Na Figura 16 é apresentada a seção C1 (dipolo 10 m), que mostra as relações espaciais entre a área preenchida com resíduos (4,5 ohm.m), a base do aterro (solo residual de basalto,

com 185 ohm.m), a zona saturada (24 ohm.m) e a rocha inalterada (450 ohm.m). Nessa seção, pode ser observada a espessura máxima da camada de resíduos na época, de cerca de 20 m, e o nível d'água encontrava-se a cerca de 26 m de profundidade nessa posição.

A seção C4, executada fora da área do aterro (no sentido do fluxo subsuperficial) não mostrou zonas de baixa resistividade na zona saturada que poderiam caracterizar efeitos da contaminação. Essa seção está apresentada na Figura 17, onde podem ser observadas as relações entre os vários materiais existentes e, inclusive, a presença do túnel que dá acesso ao aterro sanitário sob a faixa de rolamento da rodovia.

O conjunto de dados obtidos possibilitou delimitar as áreas ocupadas pelos resíduos e as posições das camadas de solo, zona saturada e rocha sã, que constituem atributos importantes no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos.

De forma análoga ao que foi feito na área do lixão, algumas linhas foram executadas em períodos distintos, e mostraram variação dos valores de resistividade aparente para a área ocupada pelos resíduos. Na linha executada fora da área do aterro sanitário (C4), a variação é sensível apenas para os níveis teóricos menos profundos (10 e 15 m). Observando os períodos em que foram executados os ensaios e as condições de chuvas na época, os resultados sugerem uma relação entre o aumento da quantidade de água e uma diminuição dos valores de resistividade aparente dentro dos resíduos, como observa-se na Figura 18.

Esses ensaios realizados em períodos distintos na linha C1 mostram um aumento da área de baixa resistividade (menor que 20 ohm.m) e uma diminuição dos valores de resistividade dentro dessa área (intervalo de 0 a 10 ohm.m) nas estações climáticas de maior pluviosidade, e principalmente, em seguida a períodos chuvosos. Esse contexto mostra que a infiltração de águas pluviais é um fator indesejável, pois o aumento do volume infiltrado ocasiona um incremento na geração de chorume, e consequentemente uma potencial contaminação das águas subsuperficiais.

Como pode ser observado nas seções geoeletricas, a variação dos valores de resistividade aparente sugerem que a infiltração das águas pluviais no maciço de resíduos contribui de forma significativa para o aumento do volume de líquidos contaminantes. Um outro aspecto que deve ser levado em consideração nessa análise é que, por se tratar de um empreendimento em operação, ocorre um aumento progressivo do volume de resíduos dispostos, sendo os perfis topográficos nas seções relativos à época de aplicação dos ensaios. Esse aumento do volume de resíduos pode também ter uma parcela de influência nessa variação dos valores de resistividade, mas o aumento da grau de saturação dentro dos resíduos é o fator mais importante.

Os ensaios de caminhada elétrica dipolo dipolo forneceram dados para a elaboração de mapas de resistividade aparente para várias profundidades, as quais possibilitaram uma visualização do comportamento da área contaminada. Dessa forma, foram elaborados mapas com os dados obtidos em junho e setembro de 1995, os quais mostram que a zona contaminada fica mais restrita à área do aterro sanitário, não sendo forte a indicação de uma frente de contaminação evoluindo na zona saturada. De acordo com os resultados das SEVs os mapas dos níveis 20 e 30 m estão representando profundidades abaixo da zona saturada (parcialmente, no mapa 20 m, pois no centro do aterro a zona saturada está mais distante da superfície, devido a maior espessura de resíduos). Dessa forma, o

mapa do nível 30 m é o mais indicado para análise da ocorrência de contaminação. Esse mapa, apresentado na Figura 19, caracteriza principalmente a zona saturada e como citado anteriormente, não indica estar havendo migração da frente de contaminantes, pois os valores de resistividade aparente inferiores a 50 ohm.m ficam restritos à área ocupada pelos resíduos. Pode ser observado que os valores de resistividade aparente menores que 10 ohm.m não ocorrem mais, como acontecia nos níveis superiores, indicando que nessa profundidade a influência dos resíduos ou de líquidos percolantes é menor.

Por outro lado, em algumas sondagens elétricas posicionadas nas bordas do aterro sanitário, os valores de resistividade obtidos para a zona saturada foram bastante baixos (menores que 10 ohm.m), sugerindo a presença de contaminantes. Então, de acordo com os resultados obtidos pelos ensaios geofísicos,

nessa área, embora pudesse estar ocorrendo a entrada de líquidos percolados em pontos abaixo e muito próximos do aterro, na época ainda não parecia estar ocorrendo migração dessa contaminação nas águas subsuperficiais. Isso é confirmado pelos dados dos poços de monitoramento existentes na área do aterro que, em análise de parâmetros físico-químicos das águas de julho de 1998, realizada pelos responsáveis pelo aterro sanitário, mostravam resultados dentro das normas (Tabela 7).

CONCLUSÕES Os resultados obtidos mostram que a aplicação dos ensaios geoeletricos permitem a obtenção de dados, que criteriosamente interpretados, levando-se em consideração a geologia local e observando-se as limitações das técnicas, fornecem uma gama de informações para o estudo de áreas contaminadas pela disposição de resíduos urbanos. A utilização das técnicas de sondagem elétrica e caminhamento elétrico mostram o grande potencial de aplicação dos métodos elétricos no estudo da contaminação gerada por áreas de disposição de resíduos. Os resultados obtidos pelos ensaios geofísicos permitiram uma avaliação das áreas de disposição de resíduos quanto às características do meio físico (nível d'água, fluxo subterrâneo, espessura dos materiais inconsolidados, presença de fraturas) e quanto às relações entre os resíduos e o local de disposição (detecção e delimitação da zona de influência e avaliação da intensidade de contaminação).

Tabela 5 – Modelo geoeletrico das SEVs realizadas sobre os resíduos.

Camada	Espessura (m)	Resistividade (ohm.m)	Interpretação
1	0,7 – 3,1	11 - 17	Cobertura de aterro (+ resíduos?)
2	10,8 – 22,4	5 - 16	Resíduos + chorume
3		79 - 760	Solo de basalto (base do aterro)

Tabela 6 – Resultados das SEVs executadas fora da área ocupada pelos resíduos.

Camada	Espessura (m)		Resistividade (ohm.m)		Interpretação
1	0,7 – 1,8		39 – 62*	153 - 926	Solo superficial
2	1,7 – 10,7		14 – 132*	647 - 5439	Solo residual seco
3	2,7 – 15,4		50 – 480		Solo residual acima da zona saturada
4	-	8,3 – 18,5	2,5 - 57		Zona saturada (solo residual de basalto / saprolito)
5	-		185 - 1900		Basalto

Figura 14 – Curva de sondagem dipolar (SD 11) e interpretação.

Os resultados obtidos no Lixão de Ribeirão Preto possibilitaram determinar que:

- o sentido local do fluxo das águas subterrâneas, que apresenta duas tendências: para norte-nordeste, principalmente, e para norte-noroeste. Essa disposição é confirmada pelos mapas de resistividade aparente, que mostram a pluma desenvolvendo-se, principalmente, no sentido norte-nordeste.
- a contaminação atinge a zona saturada, que está posicionada entre 7 e 10 m abaixo da base das cavas.
- Nos períodos chuvosos, os valores de resistividade para a zona contaminada decrescem sensivelmente, indicando

Figura 15 – Mapa de fluxo subsuperficial na área do Aterro de Ribeirão Preto.

que a maior quantidade de chuva causa um aumento na geração de chorume.

- Os mapas de resistividade aparente mostram o desenvolvimento de uma pluma de contaminação, e que os poços de monitoramento estão mal posicionados. Os dados da análise físico-química das águas desses poços mostram alteração apenas no poço de número 2, que de acordo com os dados geofísicos está localizado na área de influência da pluma. Esse fato vem fortalecer a idéia de que o posicionamento dos poços de monitoramento foi planejado inadequadamente.

No aterro sanitário de Ribeirão Preto, os resultados obtidos mostram que:

- No local há apenas um sentido de fluxo subsuperficial, que é para norte;
- Os resultados geofísicos não indicam que os contaminantes estejam migrando até a zona saturada, embora em algumas sondagens elétricas posicionadas nas bordas do aterro, os valores de resistividade obtidos para o nível saturado foram bastante baixos (menores que 10 ohm.m), sugerindo a presença de contaminantes.
- Os mapas de resistividade aparente mostram que a zona contaminada fica mais restrita à área do aterro, sugerindo não existir uma frente de contaminação evoluindo na zona saturada.
- Nos períodos chuvosos, da mesma forma que ocorreu para a área do Lixão, os valores de resistividade para a zona contaminada decrescem sensivelmente, indicando que a maior quantidade de chuva causa um aumento na geração de chorume.

Esse conjunto de informações obtidas mostra que os métodos elétricos constituem-se em uma ferramenta eficiente no

Figura 16 – Seção modelada de resistividade elétrica da Linha C1.

Figura 17 – Linha C4, executada a norte do aterro sanitário, fora da área com resíduos.

Figura 18 – Seções de resistividade aparente da Linha C1 executadas em diferentes períodos climáticos.

Figura 19 - Mapa de resistividade aparente para o nível teórico 30 metros.

estudo de áreas de disposição de resíduos. Os atributos analisados nas duas áreas de estudo denotam a importância da instalação desse tipo de empreendimento em locais adequados do ponto de vista geológico e geotécnico. No Lixão estudado, que foi implantado sem critérios técnicos em ambiente geológico inadequado, existe uma pluma de contaminantes migrando dos resíduos para a zona saturada. No caso do aterro sanitário, instalado em local mais apropriado e em operação orientada por critérios técnicos, os resultados indicam que os contaminantes estão restritos a área ocupada pelos resíduos, não ocorrendo migração até as águas subsuperficiais.

Agradecimentos Agradecemos à FAPESP pela auxílio concedido para a realização do projeto de pesquisa e ao CNPq pelo financiamento do trabalho de doutorado do primeiro autor. Aos autores da RBG pelas sugestões aos manuscritos.

Tabela 7 - Dados da análise físico-química das águas dos poços do Aterro Sanitário (Fonte DURSARP – Depto de Urbanização e Saneamento de Ribeirão Preto)

Parâmetros	Poço ATS.4 (07.1998)	Poço ATS 5 (07.1998)	Poço ATS 6* (07.1998)
pH	5.40	5.38	6.10
Cor aparente (PtCo) ¹	13	31	12
Turbidez (NTU) ²	2,2	3,4	2,9
Condutividade (mho's/cm)	5.63×10^{-3}	8.73×10^{-3}	7.15×10^{-3}
Sólidos totais dissolv. (mg/l)	52.00	69.00	91.00
Sólidos suspensos	5	6	4
Sólidos sedimentáveis	< 0.1	0.1	< 0.1
Nitrato NO ₃ ⁻ (mg/l N)	0.001	0.084	1.052
Nitrito NO ₂ ⁻ (mg/l N)	0.001	0.002	0.001
NH ₄ ⁺ (mg/l N)	0.012	0.001	0.009
SO ₄ ⁻ (mg/l)	3.38	3.29	3.66
Oxigênio Consumido (mg/l)	< 1	< 1	< 1
Oxigênio Dissolvido (mg/l)	4.0	4.0	3.8
Cl ⁻ (mg/l)	1.00	9.00	1.00
PO ₄ ⁻ (mg/l)	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Dureza Total (mg/l CaCO ₃)	21	30	29
Alc. Carbonato (mg/l CaCO ₃)	0	0	0
Alc. Hidróxido (mg/l CaCO ₃)	0	0	0
Alc. Bicarbonato (mg/l CaCO ₃)	24	20	24
Surfactantes (mg/l)	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Óleos e graxas (mg/l)	< 1	< 1	< 1
Fenóis (mg/l)	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Mn (mg/l)	0.010	0.330	0.004
Al (mg/l)	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Zn ⁺⁺ (mg/l)	0.013	0.007	0.003
Pb ⁺⁺ (mg/l)	0.001	0.001	0.001
Fe ³⁺ (mg/l)	0.319	0.349	0.335
Ca ²⁺ (mg/l)	6.35	6.01	8.73
Mg ²⁺ (mg/l)	2.32	2.39	2.57
Coliformes Totais (NMP / 100 ml) ³	< 2	< 2	< 2

* Localizado fora da área do Aterro, cerca de 400 metros a leste do ATS5.

¹ PtCo: mg/l de mistura de platina e cobalto (padrão de cor)

² NTU: unidade nefelométrica de turbidez

³ NMP/100ml: n. mais provável de coliformes para 100ml de amostra

Referências

- Benson R.C., Glaccum R.A. & Noel, M.R. 1982. *Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration*. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 236p.
- Gois J.R., Pinheiro Jr V. & Rigotti A. 1997. Mapeamento Geométrico do Aterro da Lamenha Pequena.. In: Congr. Inter. Soc. Bras. Geofis., São Paulo, Anais, Vol 2, pp. 1216-1219.
- Hyoung-soo K. & Yeonghwa K. 1997. Geoelectrical Monitoring in Nanji Waste Landfill. In: Congr. Inter. Soc. Bras. Geofis., São Paulo, Anais, Vol 1, pp. 494-498.
- Kollmann W.F.H. & Supper R. 1997. Combined tracer techniques for the simulation of contaminant transport by geoelectric detection of introduced salt. *Engineering Geology and the Environment*, Balkema, Rotterdam, pp. 1943-1947.
- Nascimento C.T., Koide S., Pires A.C.B. & Mello G.A. 1999. Pseudo-seções elétricas na avaliação da contaminação do subsolo. *Rev. Bras. Geoc.* **29**:612-626.
- Pejon O.J. & Zuquette L.V. 1991. Importância de estudos geológico-geotécnicos para a disposição de rejeitos urbanos. II Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, CBGB, Rio de Janeiro-RJ, pp. 367-377.
- Stollar R.L. & Roux P. 1975. Earth resistivity surveys - A method for delineating groundwater contamination. *Ground Water*, **13**:145-150.
- Zuquette L.V., Pejon O.J., Sinelli O. & Gandolfi N. 1994. Methodology of specific engineering geological mapping for selection of sites for waste disposal. 7th International IAEG Congress, Lisboa, Portugal, pp. 2481-2489.

Manuscrito A-1257

Recebido em 20 de setembro de 2001

Revisão do autor em 20 de dezembro de 2001

Revisão aceita em 24 de dezembro de 2001